

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Hans Leis

**VÄGA ENERGIATÕHUSA HOONE KÜTTEENERGIAVAJADUSE DÜNAAMIKA
2016/2017 TALVEL EESTI ESIMESES SERTIFITSEERITUD PASSIIVMAJAS
KOGUTUD MÕÕTETULEMUSTE PÕHJAL**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: MSc Kristo Kalbe

TARTU 2017

Väga energiatõhusa hoone kütteenergiavajaduse dünaamika 2016/2017 talvel Eesti esimeses sertifitseeritud passiivmajas kogutud mõõtetulemuste põhjal.

Prognoositavalt on energiatõhusad hooned Eestis mõne aasta pärast väga aktuaalsed, sest alates 2021. aastast peavad Eestis ja Euroopa Liidus kõik uued ehitatavad hooned olema liginullenergiahoone. Käesolevas bakalaureusetöös uuriti Põlvas asuva Eesti esimese sertifitseeritud passiivmaja kütteenergiavajadust talvisel perioodil. Sama hoone on ühtlasi ka netonullenergiamaja, täites ka liginullenergiamaja hoone nõudeid. Seda hoonet on erinevatest aspektidest küll põhjalikult uuritud, aga siiani pole selle hoone kütteenergiavajadust kirjeldatud. Töös vaadeldi, kuidas muutub hoone kütteenergiavajadus talvisel perioodil, kui õhutemperatuur langeb oluliselt alla 0°C. Samal ajal vaadeldi ka päikese kiirguse hulka ja selle mõju hoone kütteenergiavajaduse muutumisele. Töös leiti, et hoone kütteenergiavajadus on kogu talve vältel ühtlane ja esinevad vaid väiksemad tõusud ja langused. Välisõhu temperatuuri langemisel alla -20°C suurenes küttekulu, kuid kuna kahel ainsal külmal perioodil oli ilm pilvitu, ei tõusnud kütteenergiavajadus oluliselt. Passiivne päikeseenergia, mis hoonesse suurte akende kaudu sisenes küttis päevasel ajal hoone ise soojaks.

Märksõnad: *energiatõhus ehitus, liginullenergiahoone, kütteenergiavajadus*

CERCS kood: T230 Hoone ehitus

Very energy efficient building space heating energy demand dynamics based on data collected from the first certified passive house in Estonia during 2016/2017 winter.

After some time, energy efficient building is predictably very actual topic in Estonia, because from 2021 in EU and in Estonia all new buildings have to be nearly zero-energy buildings. The aim of this study was to analyze space heating energy demand of Estonia's first certified passive house during winter. In this study, building's heating energy demand was monitored while outside air temperatures were below 0°C. Results showed that building's heating energy demand was steady for all winter, with some small fluctuations. Sun had significant impact on building's heating demand. When it was sunny, heating energy demand was clearly lower.

Keywords: *energy efficient building, nearly zero-energy building, space heating energy demand*

CERCS code: T230 building construction

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Teoreetiline osa.....	5
1.1 Energiatõhus hoone.....	5
1.1.1 Kütteenergiavajadus.....	7
1.1.2 Hoone sisekliima.....	8
1.2 Põlva passiivmaja iseloomustus.....	10
1.2.1 Küttelehendus	12
1.2.2 Passiivne päikeseenergia ja tampsavisein	15
1.2.3 Soojusenergia ülekanne eluruumidesse	17
1.2.4 Hoone massiivsus.....	18
2. Metoodika	20
2.1 (PHPP)Passive House Planning Package.....	20
2.2 Lugemite kogumine	21
2.3 Sontex veemõõturid	21
2.4 Hoones olevad andurid	22
2.5 Uuritava ajaperioodi kliimatingimused.....	23
3. Tulemused.....	24
3.1 Mõõdetulemused.....	25
3.1.1 1.-10. jaanuar	26
3.1.2 4.-12. veebruar	27
3.1.3 11.-18. veebruar	28
3.1.4 Jahe päikeseline periood vs soe päikeseline periood	29
3.2 Hoone massiivsuse muutmine PHPP's	31
3.3 Sontex veearvesti riknemine mõõteperioodi ajal.....	32
Kokkuvõte.....	33
Summary	33
Kasutatud kirjandus	34

Sissejuhatus

Teadlikkus energiatõhusa ehituse valdkonnast on Eestis viimaste aastate jooksul suurenenud.

[1] Energiatõhus ehitus tähendab väikese energiakulu ja keskkonnasaastega hoonete projekteerimist ja ehitamist. Kuna Euroopa Liit on otsustanud vähendada hoonete energiatarbimist ja keskkonnasaastet, on energiatõhus ehitus tulevikus nii Eesti riigile kui ka erasektorile väga oluline teema. Selle teemavaldkonna kohta on mõttekas läbi viia uurimusi ja koguda ennetavat informatsiooni juba praegu.

Täna sel päeval muudab energiatõhusa ehitusega seotu eriti aktuaalseks just see, et Euroopa Liidu hoonete energiatõhususe direktiivi [2] kohaselt peavad 31. detsembrist aastal 2018 kõik uued ehitatavad avalikud hooned olema liginullenergiahooned ja kõik uued ehitatavad eramud peavad olema liginullenergiahooned 31. detsembrist aastal 2020. Selle direktiivi jõustumine pole enam kaugel ja nii projekteerijad kui ka ehitusettevõtted peavad end enne tähtaegade saabumist lisaks harima ja kuupäevade saabumisel suutma direktiivi nõudeid järgida. Selle direktiiviga soovitakse parandada ELis hoonete energiatõhusust, võttes arvesse mitmesuguseid kohalikke ja kliimatingimusi. Õigusaktis on sätestatud miinimumnõuded ja ühtne meetodika. Direktiiv hõlmab energiat, mida kasutatakse seoses kütmise, vee soojendamise, jahutuse, ventilatsiooni ja valgustusega. [2]

Kui hoone on rajatud, moodustab seal kõige suurema energiatarbe kütteks vajaminev energia, seepärast valgustid, kodumasinad jms. [3] Kõige loogilisem ja kuluefektiivsem on vähendada kütteks vajaminevat energiahulka, sest seda on proportsionaalselt kõige rohkem. Kütteks kuluvat energiahulka vähendatakse energiatõhusate hoonete puhul eelkõige soojustuse suurendamisega ja parimate tehnoloogiliste ehitusvõtete kasutuselevõttuga. Näiteks kasutatakse väga väikese soojusjuhtivusega aknaid, välisseinad soojustatakse korralikult, hoone ehitatakse õhupidav, väldidakse külmasildade teket ja kasutatakse soojustagastusega ventilatsiooni.

Antud töö eesmärkideks on uurida, kas Põlvasse rajatud Eesti esimene sertifitseeritud passiivmaja täidab oma projekteerides seatud eesmärged ja kuidas reageerib hoone kütteenergiavajadus välisõhu temperatuuri ja päikesekiirguse muutusele. Töö näitab, kas ja kuidas on Põlvasse rajatud Eesti esimene sertifitseeritud passiivmaja Eesti talvisest kliimast mõjutatav ning millised seaduspärasused sellega kaasnevad. Seega on käesolev töö ka

sobivaks juhendmaterjaliks projekteerijatele sarnaste hoonete loomisel – näiteks küttesüsteemi valikul või konstruktsioonide massiivsuse määramisel.

1. Teoreetiline osa

1.1 Energiatõhus hoone

Järjest enam on nii Euroopas kui ka Eestis teemaks energiatõhus ehitus ja hoonete küttekulude minimaliseerimine. Energiatõhusa hoone tõlgendusi ja definitsioone on mitmeid. Käesoleva töö raames on mõttekas piirata see Eesti Vabariigi Valitsuse määruses defineeritud liginullenergiahoonega, mis saab peagi kohustuslikuks, kuid mille energiatõhususarvu piirnorm on väga madal. Liginullenergiahoone on parima võimaliku ehituspraktika kohaselt energiatõhususe- ja taastuvenergiatehnoloogia lahendusega tehniliselt mõistlikult ehitatud hoone, mille energiatõhususarv on suurem kui $0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, kuid väikeeleamute puhul mitte suurem kui $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. [4] Eesti keskmise hoone kütteenergiavajadus köetavale pinnale on aastas 160-260 kWh [5]. 33% kogu Eesti riigi energiatarbimisest toimub kodudes. [6]

Hoonete energiakulu moodustab 40% Euroopa Liidu (EL) energia kogutarbimisest [2] ja kogu Euroopa Liidu CO₂ emissioonist 36% on hoonetest pärit. [7] 85% hoonetes kasutatavast energiast kulub kütmiseks, valgustuseks ja sooja tarbevee tootmiseks. [8] Euroopa Liidus juhtivatel kohtadel töötavad inimesed mõistavad, et seda osakaalu on vaja vähendada.

Eesti Vabariigi Valitsus on viinud kohaliku määrustiku vastavusse Euroopa Liidu direktiiviga 2010/30/EL hoonete energiatõhususe kohta. Sellega seoses on toimunud ja toimuvad märkimisväärsed muudatused hoonetele seatud energiatõhususe miinimumnõuetes. Tabelis 1. on toodud eri tüüpi hoonete energiatõhususarvude piirmäärad. Sellest lähtub, et juba täna, enne 2020. aasta kätte jõudmist on vaja mõelda sellele, et ülikoolides loodusteaduste ja ehitusega seotud tudengid oleks kooli lõpetades energiatõhusa ehituse teemaga hästi kursis. Samuti on vaja pädevaid ehitusettevõtjaid. Ehitusettevõtjad peavad endale selgeks tegema energiatõhusa ehituse põhimõtted ja ka nende reaalsed rakendusviisid. Täna on neil juba Eestis mõnelt valminud objektilt õppida. Üheks heaks näiteks on Põlvas 2017. aasta jaanuaris avatud Põlva riigigümnaasium. Tegemist on avaliku hoonega, mis on projekteeritud ja ehitatud liginullenergihoone miinimumnõuetele vastavalt. Teiseks heaks näiteks on käesolevas töös uuritud Põlva ühepereelamust passiivmaja. Põlva passiivmaja on

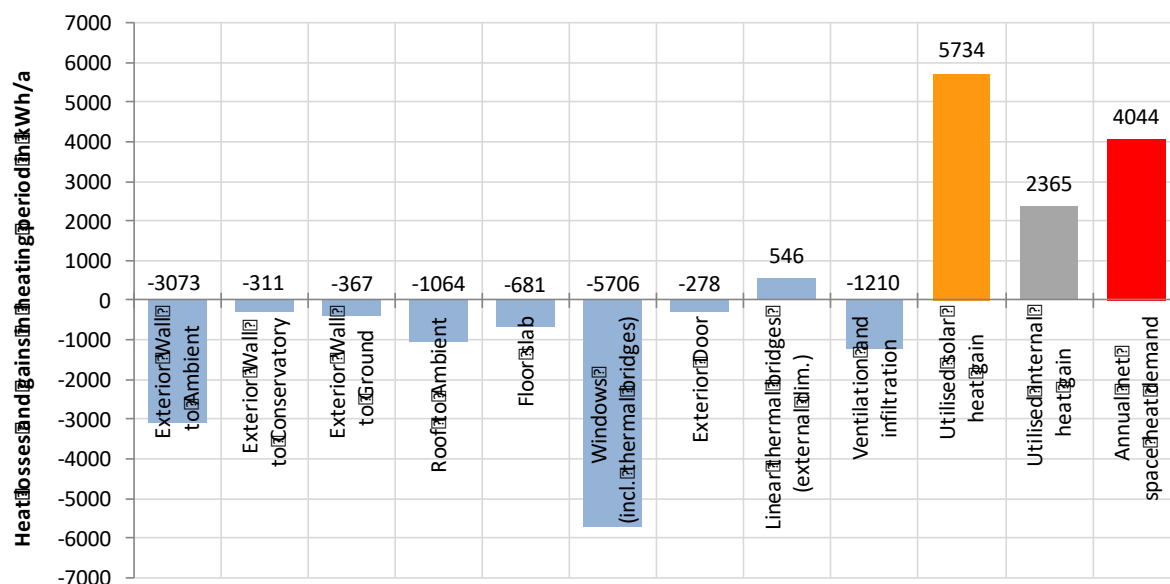
netonullenergiahoone, täites ühtlasi ka liginullenergiahoonele esitatud nõuded. Seega on esindatud juba kahte tüüpi hooneid.

	enne 9.01.2013	al. 9.01.2013	2019/2021 liginullenergiahoone
	Energiatõhususarv kWh/(m ² a)		
väikeleamud	180	160	50
Korterelamu	150	150	100
Haridus- ja teadushooned	300	160	90

Tabel 1. Hoonete energiatõhususarvude piirmäärad Eestis erinevatel ajaperioodidel. [9]

1.1.1 Kütteenergiavajadus

Eesti asub piirkonnas, kus suurel osal aastast on õhutemperatuur nii madal, et inimesel on hoones ilma eluruume kütmata elada ebamugav ja ruumitemperatuur on nõuetele mittevastav. Eluruumides on vaja saavutada kütmisega sobilikud temperatuurid. Kui aga hoone sees on võrreldes välistemperatuuriga kõrgem temperatuur, hakkab soojusenergia soojemalt kehalt külmemale kehale liikuma ehk hoonest väliskeskkonna suunas. Sellest tuleneb vajadus hoonesse energiat lisada ehk tekib kütteenergiavajadus. Hoone kütteenergiavajadus sõltub peamiselt sellest, kui suured on hoone soojakaod ja kui suur on hoonesse sisenev vabaenergia. Joonisel 1. on välja toodud Põlva passiivmaja soojusbilanss. Siniste tulpade näol on tegemist hoone soojuskadudega.



Joonis 1. Põlva passiivmaja soojusbilanss. Allikas: [26]

Soojuskaod tulenevad hoonetes peamiselt akendest ja muudest piirdetarinditest ning hoone ventileerimisest.

Kütteenergiavajadus arvutatakse valemiga:

$$Q_H = Q_T + Q_V - \eta \times (Q_S + Q_I)$$

Q_H = hoone kütteenergiavajadus

Q_T = transmissioonikadu

Q_V = energiakadu ventilatsioonisüsteemist

η = vabaenergia utilisatsioonitegur

Q_S = päikesevabaenergia

Q_I = inimeselt, elektriseadmetelt jms pärinev vabaenergia

Valemi seletus:

- Transmissioonikaod on soojakaod, mis lähtuvad hoone välispiiretest; akendest; välisseintest; katusest ja põrandast.
- Vabaenergia on inimestelt, elektriseadmetelt, valgustuselt ning ruumi pindadelt eralduv soojus.
- Vabaenergia utilisatsioonitegur näitab kui suur osa hoonesse sisenevast soojusenergiast on kasutatav hoone kütmiseks.

1.1.2 Hoone sisekliima

Lisaks sellele, et hoone peab olema ehitustehniliselt hästi ehitatud, tuleb arvestada ka hoones viibiva inimese ja tema käitumisega selles hoones, sest inimene veedab ca 90% ajast hoone siseruumides. [10] Inimesed ja nende mugavuslaved on erinevad, aga kokkuvõtvalt peab inimesel olema oma kodus või töökohas mugav olla. ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) standardi 62-1999 [11] järgi defineeritakse mugavus kui meeleseisund, mis väljendab rahulolu ümbritseva keskkonnaga. Sisekliima peamisteks kvaliteedinäitajateks on hubasus ja inimese hea enesetunne. Pildil 1. on näha Põlva passiivmaja hubane elutuba. Mõnda väärtust, nagu näiteks temperatuur, müra, valgustatus või suhteline niiskus, saab mõõta, aga kokkuvõttes on inimese jaoks siiski hubane tuba väga erinev. [12]

Soojusolukorrale ehk ruumiõhu temperatuurile esitatavad nõuded ja piirväärtused põhinevad soojustajul ja keha soojustasakaalul. Keha soojusolukord peaks olema selline, et

soojustasakaalu hoidmiseks poleks vaja higistada. Siseroomides on optimaalne temperatuuride vahemik 22...25 °C.

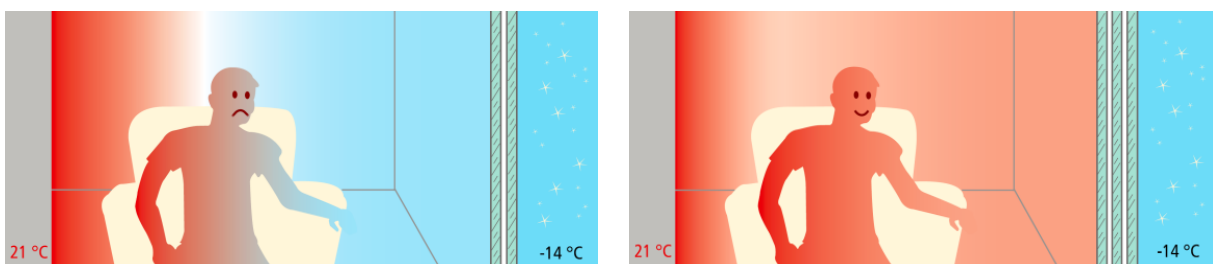
Õhuniiskus mõjutab oluliselt organismi soojusvahetust keskkonnaga. Niiskem õhk soosib madala õhutemperatuuri korral organismi ülejahtumist, kõrge temperatuuri puhul aga ülekuumenemist, sest niiske õhk on suurema soojusmahtuvusega. Eesti standardi järgi peaks ruumi siseõhu suhteline niiskus olema talvel 25...40 % ja suvel 30...70%.

Ruumides on CO₂ põhiallikaks tihti inimene ise. Inimese poolt väljahingatavas õhus on palju süsinikdioksiidi. Kui CO₂ sisaldus on vähene, tekib ebamugavuse ja umbsuse tunne ja pideva kokkupuute korral võivad tekkida peavalu, peapööritus ja iiveldus. Süsinikdioksiidi piirnormiks eluruumides on 0,5% koguõhu sisaldusest ehk 5000 ppm (*parts per million*). [13]

Sisekliima sõltub näiteks hoone massiivsusest, ehituse kvaliteedist, ventilatsioonist ja seal kasutatud siseviimistlusmaterjalide valikust ja omadustest.

Ka antud töös uuritud kütteenergia dünaamika mõjutab sisekliimat. Heas sisekliimas on siseõhu temperatuur ja niiskus aastaringselt stabiilne, esinevad vaid sessoonsed kõikumised. Kui siseõhu temperatuur on ööpäeva lõikes suures muutumises mõjub see sisekliimale negatiivselt. Heaks näiteks selle kohta on vanemad hooned, kus köetakse ahjudega. Ahjusid köetakse õhtuti, kui minnakse magama ja sellega tõuseb ka siseõhu temperatuur. Öösel aga ahju ei köeta ja õhutemperatuur hakkab langema. Seega on hommikuti talvisel perioodil vanemates ahiküttega hoonetes tihti siseõhutemperatuur ebamugavalt madal.

Ruumis peab igal pool ja igas nurgas olema võrdselt mugav olla. Seda on visualiseeritud ka pildidel 2 ja 3 kus on kujutatud inimese mugavust, kui ruumis valitsevad eri piirkondades erinevad temperatuurilukorrad.



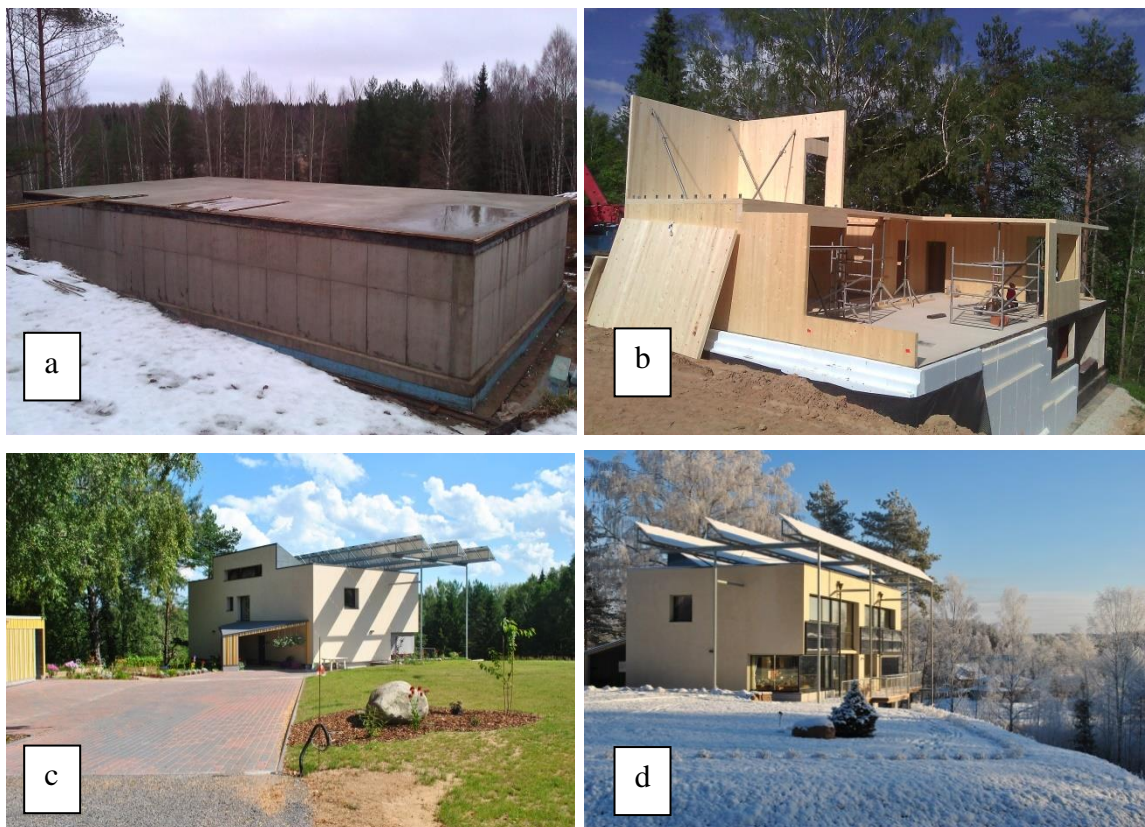
Joonis 2. ja 3. Inimese soojusmugavus ruumis. Allikas:passipedia.org



Pilt 1. Hoones on mugav sisekliima. Foto: Sense OÜ

1.2 Põlva passiivmaja iseloomustus

Antud töö jaoks kogutud andmed pärinevad Eesti esimesest sertifitseeritud passiivmajast/netonullenergiamajast. Hoone asub Põlvas aadressil Metsa 5A. Hoone projekteerimisega alustati aastal 2010 ja hoone valmis 2013 veebruaris. Eramu on projekteeritud Austria arhitektibüroo Architekturbüro Reinberg poolt. Projekti viis Eesti regulatsioonidega kooskõlla OÜ Sense, kes tegeles ehituse juhtimisega ning projekteeris ja tootis pildil d) nähtavad välispiirete soojustuses kasutatud puistevilla jaoks spetsiaalsed C-talad. Hoone on kolmekorruseline ja selle planeerimisel on silmas peetud energiatõhusa hoone ehitamise põhimõtteid ja tehnilisi lahendusi. Keldrikorrusel asuvad tehnoruum, saunad, sauna eesruum, panipaik ja sportimise ruum. Esimesel korrusel on elutuba, köök, vannituba, garderoobid ja magamistuba. Teisel korrusel on kolm magamistuba, vannituba, kontor ja garderoob. Hoone on risttahuka kujuline ja suunatud ühe pikema küljega otse lõunasse. Lõunaküljes asub ka suurem osa aknapinnast. Eramu on massiivse konstruktsiooniga ning ka siseviimistluses on kasutatud palju massiivsust lisavat savi. Hoone kahe ülemise korruse nii välis- kui ka siseseinad on tehtud KLH riskihtpuidust, joonis b) ja keldrikorrus on raudbetoonist, joonis a). Soojustuseks on kasutatud 400 mm Werrowool tselluvilla seintes, 500 mm EPS vundamendil vastu pinnast, 300 mm XPS keldri põrandal.



Pilt 2-5. a) raudbetoonist keldrikorrus, b) KLH ristkihtpuidust sise- ja välisseinad, c) ja d) hoone välisvaated

Köetav pind	280,6 m ²
Ventilatsiooni soojatagastuse määr	93 %
Õhuvahetuskordsus (rõhutest)	0,36 l/h
Piirete soojusjuhtivus	
Välissein (v.a. kelder)	0,095 W/(m ² K)
Kelder	0,07 W/(m ² K)
Põrand	0,086 W/(m ² K)
Katus	0,071 W/(m ² K)
Avatäidete keskmine soojusjuhtivus (klaaspakett ja raam)	0,67 W/(m ² K)

Tabel 2. Hoone ehituslikud parameetrid.

Põlva passiivmaja katusel on 66 Sunmodule Plus SW 196 Vario Poly päikesepaneeli, mille koguvõimus on 12,94 kW. PV paneelid on monteeritud 38° nurga alla ja nende kogupindala on ligikaudu 108 m². Paneelid on suunatud täpselt lõunasse ning kõige lõunapoolsema

paneelirea ülesanne on ka suvist kõrget päikest varjutada, et vältida eluruumide ülekuumenemist.

Eramu 2016. aasta tarbitud elektrienergia oli 12 652 kWh ja päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia 11 213 kWh. Võrgust osteti elektrienergiat 10 865 kWh ja müüdi 9426 kWh elektrienergiat.

Konkreetses eramu elektrienergia tarbimise ajalist kattuvust päikesepaneelide tootlikusega on põhjalikult analüüsitud Tartu Ülikoolis 2015. aastal valminud magistritöös. Töös leiti, et enda toodetud elektrienergiast kasutati ära vaid 17,2%, mis tulenes paneelide suurest tootlikkusest päeva keskel ning majas elava pere väikesest tarbimisest päevasel ajal. [14]

1.2.1 Küttelahendus

Sel perioodil kui päikese vabaenergiast ei piisa Põlva passiivmajas mugava sisekliima tagamiseks on hoone kütmiseks maasoojuspump ja päikesekollektorid. Need energiaallikad on projekteeritud koos töötama ja andma võimalikult suure soojusenergiahulga võimalikult väikse elektrienergiakuluga. Esmajärjekorras peavad hoonele soojusenergiat andma päikesekollektorid. Kui nendest ei piisa, lülitab automaatika sisse elektrienergial töötava maasoojuspumba. Kütteks ja tarbeveeks vajaminevat vett hoiustatakse kahes 1000 liitrisel paagis.



Pilt 6. Tarbe- ja küttevee paagid.

1.2.1.1 Maasoojuspump

Maasoojuspump on seade, mille abil kantakse soojusenergiat madalama temperatuuriga keskkonnalt kõrgema temperatuuriga keskkonnale. [15] Hoones kasutatakse Viessmann Vitocal 300 G BWC maa-vesi soojuspumpa. BWC (*Bore Well Compressor*) Pumba võimsus on 5,9 kW. Vesi soojuspumbad eraldavad maapinnast soojust maasondide abil. Maapõues on temperatuur kogu aasta vältel peaaegu muutumatu ja seetõttu on pump suuresti sõltumatu välistemperatuurist. Põlva majas on soojusenergia maast kätte saamiseks kaks puurauku. Mõlemad puuraugud on vertikaalsed ja 80 meetrit sügavad. Kasutataval Vitocal 300 soojuspumbal on väga kõrge COP väärtus. $COP = 4,5$. (*Coefficient of Performance*) [16]

Soojuspumba soojustegur ehk COP näitab kui tõhus on soojuspump. Mida suurem on kasutegur, seda tõhusam on soojuspump. COP on igale soojuspumba mudelile omane väärtus, mis näitab mitu korda annab seade rohkem soojusenergiat võrreldes kulutatud energiaga. [17]

COP on ajas muutuv väärtus. COP sõltub veetemperatuurist, mida soojuspumbalt saada tahetakse ja mida talle ette antakse. Mida madalam on sisendtemperatuur maa seest soojust koguval vedelikul ja kõrgem soovitud tarbe- või küttevee temperatuur, seda madalam on ka COP väärtus. Selliste maasoojuspumpade COP väärtus, mille sisendenergia saadakse puuraukudest muutub talve jooksul võrdlemisi vähe, sest maa sisesoojus on pidevalt ühtlane.

Maasoojuspump töötab analoogselt külmpapis, aga täpselt vastupidi. Külmpapis juhitakse soe ruumist välja, maasoojuspumbas aga sisse. [18] Soojuspumba suletud torustikus on madala keemispunktiga külmaaine. Külmaaine läbib protsessi käigus nelja komponenti: kompressor, kondensor, paisuventiil ja aurusti. [15] Külmaaine suunatakse puuraukudesse, kust ta omandab endasse maa sisesoojust. Kui soojenenud külmaaine jõuab tagasi maasoojuspumpa, juhitakse ta vedelikku, mille keemispunkt on niivõrd madal, et vedelik mis maa sees üles soojenes ajab selle keema. Keema läinud vedelik hakkab aurustuma ja aur suunatakse kompressorisse. Kompressoris kasutatakse elektrienergiat, et aur kokku suruda ja tema temperatuuri veel kõrgemaks muuta. Kui aur on tihendatud, liigub ta soojusvaheti põhimõttel toru sees jahedamasse keskkonda, mida on vaja soojendada. [19] Antud töö puhul on selleks keskkonnaks kas kütte- või tarbevesi.



Pilt 7. Maasoojuspump ja päikeseküttesõlm.

1.2.1.2 Päikesekollektorid

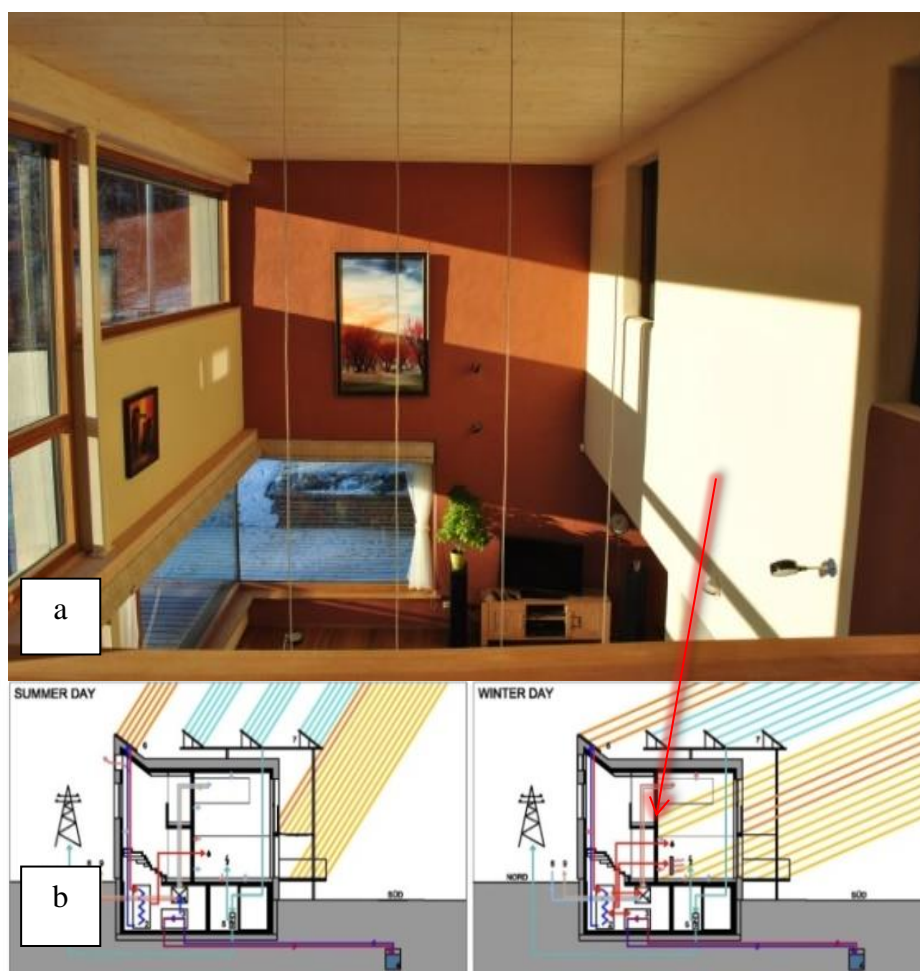
Päikesekollektorid on seadmed, milles ringleva vedeliku abil soojendatakse päikeseenergia abil tarbe- või küttevett. Päikesekollektorid ja päikeseküttesüsteem on jaotatud antud hoone puhul kahte ossa. Üks osa süsteemist asub hoone katusel ja teine osa lõunafassadil. Katusel on 45° nurga all viis Sonnenkraft SK IMK päikesekollektorit kogupindalaga 12,5 m². Need kollektorid on eesmärgiga koguda suvist päikeseenergiat, kui päike on kõrgel. Teine osa päikesekollektoritest asub hoone lõunafassaadil, kuhu on integreeritud 13 m² päikesekollektoreid. Need paneelid on maapinna suhtes 90° nurga all ja püüavad talvist, madalat päikest. Päikesekollektorite arvutuslik aastane toodang PHPP järgi on 2026 kWh.



Pilt 8 ja 9. a) Päikesekollektorid vertikaalselt ja b) 45° all katusel.

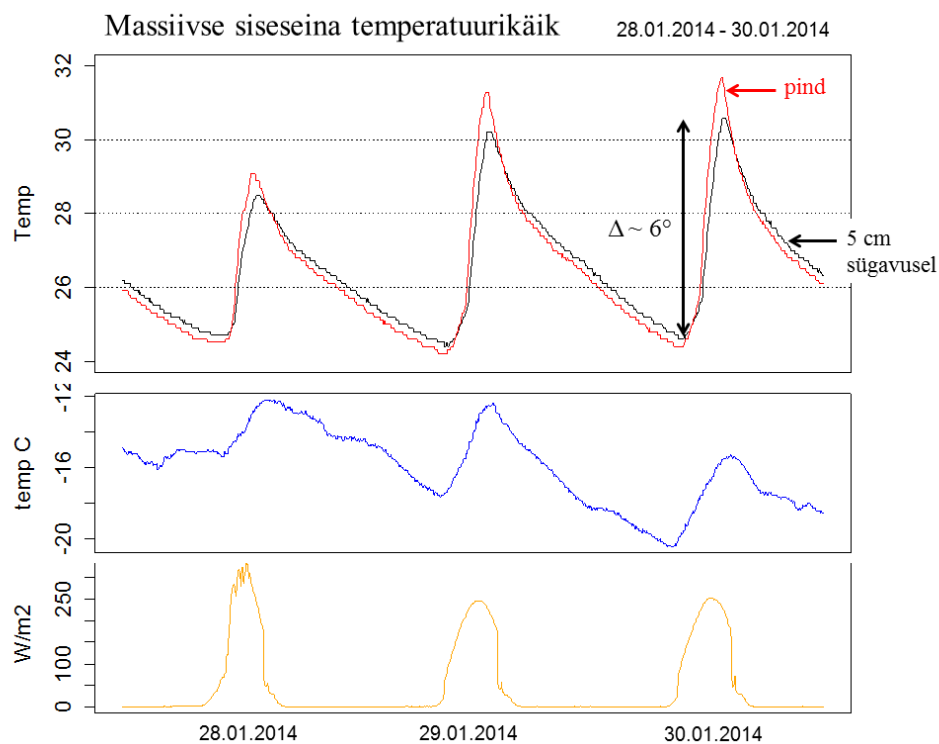
1.2.2 Passiivne päikeseenergia ja tampsavisein

Päikeseenergia siseneb hoonesse peamiselt lõunaküljel asuvatest suurtest akendest ja soojendab üles nii põranda kui ka massiivse tampsaviseina. Tampsavi on savi, mis on tambitud rakiste vahel seinaks. Kuna see savi on kokku tambitud, on selle tihedus ja soojusenergia puhverdusvõime oluliselt suurem kui savil, mida pole tihendatud. Tampsaviseina hea omadus on salvestada päeval endasse päikese kiiratud soojusenergia ja õhtu kätte jõudes vabastada see järkjärgult endast, soojendades sellega ruume, kui päike ei paista. Sellega väheneb hoone kütteenergiavajadus ja küttevõimsus ehk tampsavi näol loodud puhver vähendab küttevõimsuse piike.



Pilt 10-11. a) massiivne tampsavisein talvel madala päikese puhul, b) skeem suvise ja talvise päikese kaldenurga kohta. Allikas: Tõnu Mauring

Joonisel 4. on näidatud massiivse siseseina temperatuurikäik kolmel ööpäeval. Üksteise kohale on pandud nii temperatuurikäigud saviseina pinnal, 5 cm sügavusel, kui ka välisõhu temperatuur ja päikesekiirguse intensiivsus. Jooniselt 4. on näha, et kui hommikuti päike välja tuleb ja saviseinale paistma hakkab, tõusevad ka temperatuurid saviseina pinnal ja 5 cm sügavusel. Sein temperatuuridest on näha, et sein soojeneb päikesekiirguse toimetel 6°C. Kui saabub õhtu ja päikesepaiste intensiivsus väheneb, hakkavad järjest ka tampsaviseina temperatuurid langema. On näha, et enne jahtub sein pind ja seejärel sein sisemus. Sein jahtub kuni järgmise hommikuni.



Joonis 4. Massiivse tampsaviseina temperatuurikäik. Allikas: Tõnu Mauring

1.2.3 Soojusenergia ülekanne eluruumidesse

Hoones kasutatakse energia eluruumidesse transportimiseks Eestis vähelevinud lahendust. Kasutatakse vesi põranda- ja seinakütet. Põrandaküte on küll laialt levinud, aga seinaküte on paljude jaoks uus mõiste. Soojusenergia ülekanne toimub vee abil. Soe vesi liigub mööda torusid eluruumide põrandasse või seintesse ja annab enda soojuse jahedamale ruumile. Ruumiõhu temperatuuride reguleerimine toimub automaatselt. Iga toa seinal on termostaat, mis on seatud mingile kindlale temperatuurile ja kui õhutemperatuur langeb toas alla seatud eesmärgi, lülitub küte automaatselt sisse.

Põrandaküte

Põrandakütteala on hoones 147 m². Põrandaküttetorustik on betooni sees. Põrandakütte pealevoolu temperatuur on 39°C ja tagasivoolu temperatuur 33°C. Peamine põrandakütte ala asub elutoas, kus seinakütet kasutada piisavas koguses ei olnud võimalik. Teised põrandaküttealad on saunaruumid ja vannitoad.



Pilt 7. Põrandaküttetekontuur elutoas.

Seinaküte

Seinaküte on sama tehnoloogilise põhimõttega, mis põrandaküte, aga torud kus küttesee ringleb on asetatud seinale vertikaalselt. Seinakütet on hoones 112 m². Seinaküttetorud on erinevalt põrandaküttetorudest savi sees, mis tagab soojusenergia hõlpsama jõudmise eluruumidesse.

Selles hoones on seinakütte pealevoolu temperatuur 39°C ja tagasivoolu temperatuur 33°C. Kuna hoone köetakse soojaks madalamate vee temperatuuridega kui tavaline hoone, tähendab see, et antud eramu küttesee soojendamiseks on kulunud vähem energiat kui näiteks radiaatorkütte jaoks ja see omakorda tähendab, et ka keskkonnasaastatus on vähenenud.

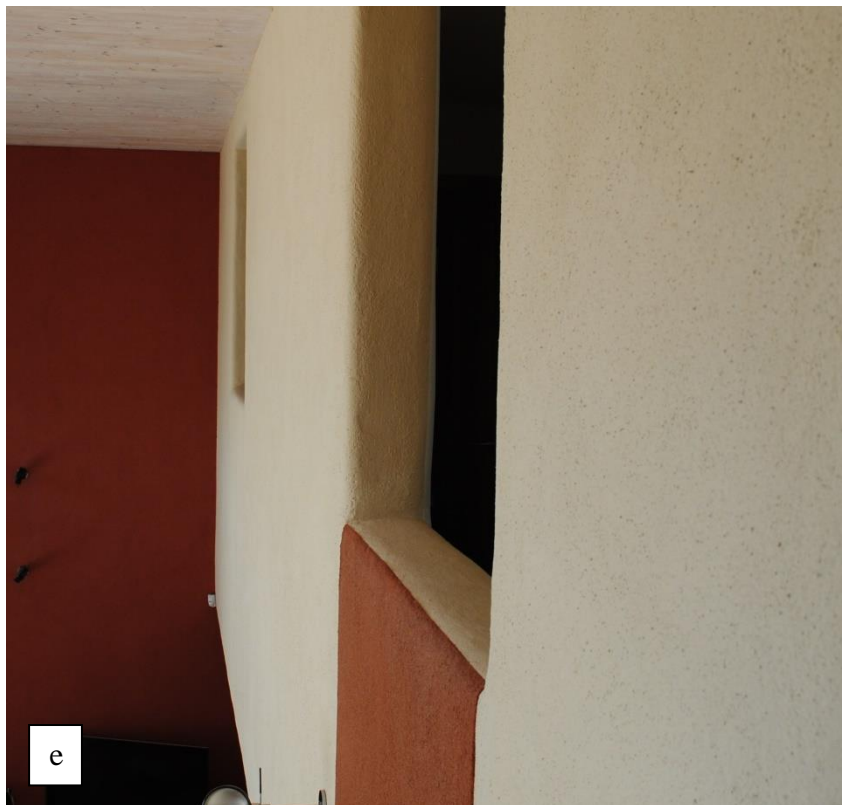


Pilt 8-10. a) seinaküttetkontuur betoonseinas b) seinaküttetkontuur puitseinas c) seinaküttetkontuur savi sees

1.2.4 Hoone massiivsus

Hoone massiivsus on oluline näitaja energiasalvestuse kohapealt. Energiasalvestus ja massiivsus aitavad erinevates olukordades kaasa nii hoone soojuseenergiasalvestusele kui ka jahutusele. Mida massiivsem on keha, seda rohkem suudab ta endas soojusenergiat salvestada ja seega aitab massiivsus kaasa ka parema energiatõhususarvu saavutamisele. Kui hoone sisetemperatuur on kõrge, suudab massiivne konstruktsioon ja massiivsed siseviimistlusmaterjalid üleliigse soojusenergia endasse salvestada ja sellega välditakse ruumi ülekuumenemist. Kui on vastupidine olukord ja ruumi sisetemperatuur on madal, hakkab massiivsest savipinnast soojus külmemale ruumile kiirgama. Just sellist lahendust on kasutatud Põlva passiivmajas, kus passiivmaja piirmäär on tagatud osaliselt hoone massiivsuse kaudu.

Selles hoones on massiivsus saavutatud peamiselt massiivse puitkonstruktsiooni (KLH), betoonist vahelagede ja väga suure hulga savi kaudu. Savi kogus on selles hoones umbes 40 tonni. Piltidel 11-15 on näidatud tampsaviseina ehitus rakiste vahel a), b) ja c); KLH seina savitööd d) ja valmis tampsavisein e).



Pilt 11-15. a), b) ja c) tampsaviseina ehitus, d) savitööd, e) valmis tampsavisein - läbimõõt 22 cm

2. Metoodika

2.1 (PHPP)Passive House Planning Package

Käesolevas töös kasutati PHPP tööriista Põlva passiivmaja ehitustehniliste näitajate algallikana, hoone massiivsuse eksperimentaalsel muutmisel ja 2016 detsember – 2017 veebruar arvutusliku küttekulu leidmiseks. Käesolevas töös sisestati Põlva passiivmaja PHPP-sse värskemaid kliimaandmeid ja katsetati energiatõhususarvu muutumist soojustuse koguse muutmisega.

PHPP on tööriist, mille abil on võimalik leida hoone energiabilanss ja aastane kütteenergiavajadus. [20] See on vajalik samm planeerimisel nii projekteerijatele, konsulteerijatele kui ka sertifitseerijatele. PHPP on üles ehitatud Microsoft Exceli failina, kus on erinevad töölehed mis katavad kõiki hoone rajamisel olulisi teemavaldkondi, näiteks nagu jahutusvajadus, ventilatsioon, varjutus, kliima jne. Uue projekti puhul on fail numbrilistest väärtusest tühi, aga valemid on oma õigete kohtade peal olemas. Faili tuleb sisestada konkreetse projekti arvulised väärtused. Tööriist põhineb konkreetsetel ehitusfüüsikalistel algoritmidel. [21]

PHPP on võrdlemisi täpne tööriist. Arvutustäpsused on leitud täpsusega +/- 0.5kWh. [22]

Ka Põlva passiivmaja arvutused tehti projekteerimise käigus PHPP tööriistaga. Tabelis 3. on Põlva passiivmaja PHPP kokkuvõtvad tulemused.

Specific Demands with Reference to the Treated Floor Area				
Treated Floor Area:		280,6	m ²	
	Applied:	Monthly method	PH Certificate:	Fulfilled?
Specific Space Heating Demand:	14,61	kWh/(m ² a)	15 kWh/(m ² a)	Yes
Heating Load:	13	W/m ²	10 W/m ²	Yes
Pressurization Test Result:	0,36	h ⁻¹	0,6 h ⁻¹	Yes
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating, Cooling, Auxiliary and Household Electricity):	119	kWh/(m ² a)	120 kWh/(m ² a)	Yes
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating and Auxiliary Electricity):	55	kWh/(m ² a)		
Specific Primary Energy Reduction through Solar Electricity:		kWh/(m ² a)		
Frequency of Overheating:	0	%	over 25 °C	
Specific Useful Cooling Energy Demand:		kWh/(m ² a)	15 kWh/(m ² a)	
Cooling Load:	1	W/m ²		

Tabel 3. Põlva passiivmaja PHPP kokkuvõte.

2.2 Lugemite kogumine

Töö autor kogus isesseisvalt töö jaoks mõõtetulemusi perioodil 31. november kuni 4. märts. Andmed kirjutati üles iga päev ja samm varieerus vahemikus 5-7 tundi. Üldiselt prooviti andmete üles kirjutamise samm hoida 6 tundi, aga mõnel puhul oli see tund lühem või tund pikem. Öösiti andmeid üles ei kirjutatud ehk siis tekkis 12 tunnine samm.

Väärtusi kirjutati üles kumulatiivselt ja kümnendiku täpsusega. Perioodid, mis olid külmemad ja pakkusid rohkem huvi märgiti üles märgitud tihedama sammuga, et leida täpsemat aega, millal kütteenergiavajadus tõusma hakkas, aga töö edenedes tihedam andmete ülesmärkimine enam tähtsust ei omanud.

Mõõteväärtuste ülesmärkimise aja hajuvuse tõttu ei olnud võimalik koostada täpselt võrdsete pikkustega 1h, 5h või ka 24h sammuga andmestikku. Seega on valitud meetod, kus graafikutele on kantud ligikaudu 24h summad, kus n-ö päeva pikkus mõõtetulemuste keskselt varieerub 20-26h vahel. Graafikutel on päevade jaotised erineva laiusega, sest päevad on graafikutel moodustunud erineva arvu tundidest. Vaatlusaluste perioodide kogupikkus on õige, kuna graafiku kogulaiuse määrav ühe tunni pikkus on püsiv. Seega on ka temperatuuri ja kütteenergiavajaduse graafikud ajaliselt täielikult kokkulangevad.

2.3 Sontex veemõõturid

Uuritavas elamus on sooja vee kulu mõõtmiseks kasutatud Sontex Superstatic 449 sooja vee arvesteid. (Pilt 16.)

Sontex Superstatic 449 on edasiarendus hästi testitud ja usaldusväärsest Superstatic 440 mudelist. Uuel mudelil ei ole liikuvaid osi, mis võiks kuluda ja see vähendab purunemiste tõenäosust. Temperatuuri mõõdetakse kahe anduriga, pealevool ja tagasivool, iga 3 sekundi tagant. [23]

Superstatic 449 sooja vee arvestite tööpõhimõte on üles ehitatud joa hajutamise ja rõhu tekitatud elektrilise impulsi mõõtmisel. Vesi juhitakse ostsillaatorisse, kus sees on pihusti, mis suurendab vee kiirust ja moodustab joa. Pihusti vastas lõhutakse peen juga eraldajaga ja vesi suunatakse nii paremale kui vasakule. Parema ja vasaku kanali lõpus on mõõdupea, kus on piezoelektriline sensor. Rõhk, mis avaldub sensorile tekitab mingi kindla elektrilise impulsi. Vesi liigub sealt mööda kanaleid tagasi torusse, kus ta juhitakse uuesti kanalites sensoriteni ja protsess kordub. [24]



Pilt 16. Sontex Supercal 449 veemõõtur.

2.4 Hoones olevad andurid

Hoonesse paigaldati ehituse käigus Keskkonnakaitse ja -tehnoloogia teadus- ja arendustegevuse (KESTA) programmi projekti 3.2.0801.11-0035 „Hoonete keskkonnamõju vähendamine läbi energiatõhususe parandamise“ raames erinevad andurid. Paigaldatud andurid mõõdavad: siseõhu temperatuuri; CO₂ kontsentratsiooni, tampsaviseina temperatuuri 3 sügavusel; ventilatsiooniseadme näitajaid; temperatuuri ja õhuniiskust välispiirete konstruktsioonis; välisõhu temperatuuri ja õhuniiskust ja summaarset päikesekiirgust.

Antud töö jaoks on olulised loetelus kaks viimast. Välisõhu temperatuur ja summaarne päikesekiirgus.

Välisõhu temperatuuri mõõtis E2227D-B tüüpi temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andur. Anduri mõõtepiirkond on -40...+85°C ja mõõtehälve +/- 0,2°C.

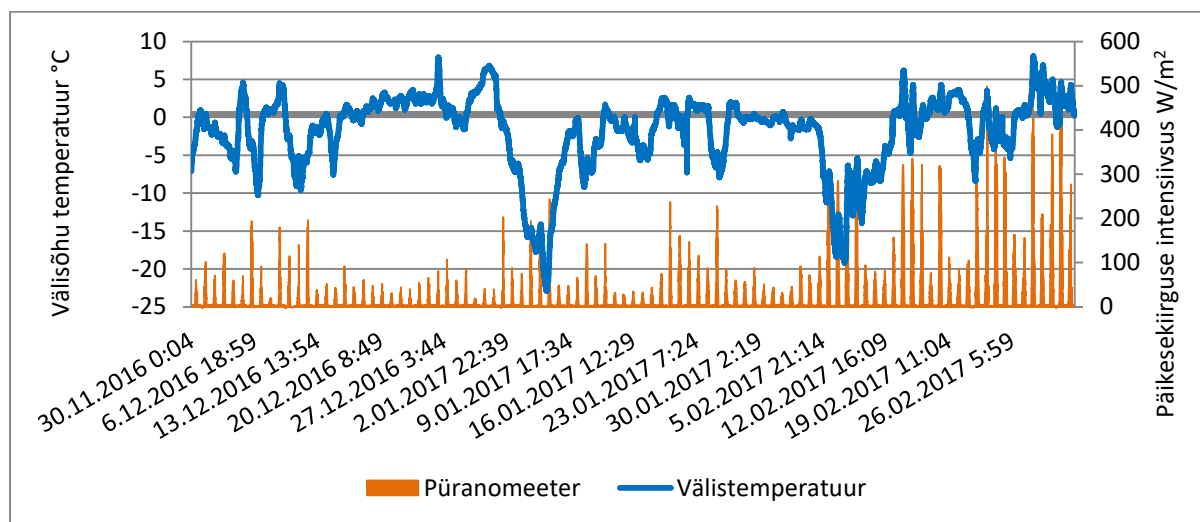
Püranomeeter - Põlva hoone katuse põhjapoolsemas ääres asub püranomeeter. Püranomeetriga mõõdetakse poolsfäärilist horisontaalsele pinnale langeva summaarse päikesekiirguse võimsust. [25] Projektis on kasutusel SR11-E2007 tüüpi ISO 1. klassi

mõõdetäpsusega püranomeeter. Anduri tundlikus on 15 qV. Päikesekiirguse võimsust mõõdetakse ühikuga W/m^2 .

2.5 Uuritava ajaperioodi kliimatingimused

Töös uuritud periood kestis 30. novembrist 4. märtsini. Sellesse perioodi mahtus 96 päeva, kus igapäevaselt toimus andmete kogumine. Töös kasutatud väga energiatõhusa hoone puhul on peamisteks kütteenergiavajaduse suurendajateks või ka vähendajateks välistemperatuur ja päikesekiirgus. Eesti kliimale on omapärane võrdlemisi sombune ja tagasihoidlike külmakraadidega talv. See tähendab, et temperatuurid ei ole pikemal perioodil ekstreemselt madalad ja päikesekiirgust ei ole palju.

Välisõhu temperatuuri mõotis ja salvestas temperatuuriandur hoone lähedal asuva garaaži põhjaküljes iga viie minuti järel. Uus info logiti arvutisse uuritava ajaperioodi jooksul 27360 korda. Temperatuuri logiti väga tihedalt ja andurite tootja poolt garanteeritud suure mõõtetäpsuse tõttu on tulemused täpsed ja usutavad. Maksimaalne õhutemperatuur ajaperioodil oli $8,1^\circ\text{C}$ ja minimaalne $-22,9^\circ\text{C}$. Keskmine õhutemperatuur oli $-1,9^\circ\text{C}$.



Joonis 3. Kogu mõõteperioodi päikesekiirgus ja välistemperatuur.

Päikesekiirguse hulk ja intensiivsus on antud hoone kütteenergiavajaduse seisukohast ülimalt olulised. Päikeselise ilma korral kogub hoone passiivset päikeseenergiat ja selle arvelt kütteenergiavajadus väheneb.

3. Tulemused

Küttevajadus oli kogu perioodil ilma suuremate kõikumisteta, olenemata sellest, et välistemperatuur langes kahel perioodil alla -20°C . See näitab, et hoone massiivsus ja tehnoloogilised lahendused toimivad.

Kogu uuritud ajaperioodil kasutati hoones kütteks 3987,3 kWh energiat. Seinaküttesse läks 1748,3 kWh energiat ja põrandaküttesse umbes 2131 kWh energiat. Kui jagada kogu kütteenergia hoone ruutmeetrite arvuga saame küttekulu ruutmeetri kohta, mis on energiatõhusate hoonete puhul oluline näitaja. Selles projektis jagades 3987,3 kWh 280,6 m² saame ruutmeetrile kulunud küttekuluks 14,2 kWh/m². PHPP arvutus näitab antud hoone kohta standardkliima andmetel, et kütteenergiavajadus perioodil detsember kuni veebruar ruumiõhu temperatuuri 24°C korral peaks olema 15,7 kWh/m². Töö autor soovis leida ka 2016/2017 talve kliimaandmete põhjal hoone kütteenergiavajadust. Konkreetse talve kõikidele kliimaandmetele ei olnud võimalik ligipääsu saada, kuna töö autoril ei olnud püranomeetri kõigi nelja ilmakaare sfääri eraldi andmeid. Töö autoril on olemas aga töös uuritud perioodi kuude keskmised välisõhu temperatuuride väärtused. Kui sisestada Põlva passiivmaja PHPP-sse need väärtused, saame PHPP järgi arvutatud küttekuluks 13,8 kWh/m². Seega PHPP arvutus on vägagi ligilähedane töö autori poolt mõõdetud küttekulu ja ruutmeetrite suhtele. Mõõdetud küttekulu on vaid 3% suurem kui PHPP arvutuses.

	Kütteenergiavajadus kWh/m ²
Töös mõõdetud	14,2
Standardkliima puhul	15,7
Uuendatud kliimaandmestiku puhul	13,8

Tabel 4. Kütteenergiavajaduste võrdlus erinevate kuude keskmiste õhutemperatuuride korral.

	Detsember (standard)	Detsember 2016	Jaanuvar (standard)	Jaanuvar 2017	Veebruar (standard)	Veebruar 2017
Keskmine õhutemp. (°C)	-3,7	-0,1	-4	-3,4	-4,6	-2,7
Põhi	3,0	3,0	5,0	5,0	10,0	10,0
Ida	5,0	5,0	10,0	10,0	21,0	21,0
Lõuna	19,0	19,0	32,0	32,0	59,0	59,0
Lääs	6,0	6,0	10,0	10,0	23,0	23,0
Üldine	7,0	7,0	13,0	13,0	31,0	31,0
Kastepunkt (°C)	-5,7	-5,7	-5,9	-5,9	-7,2	-7,2

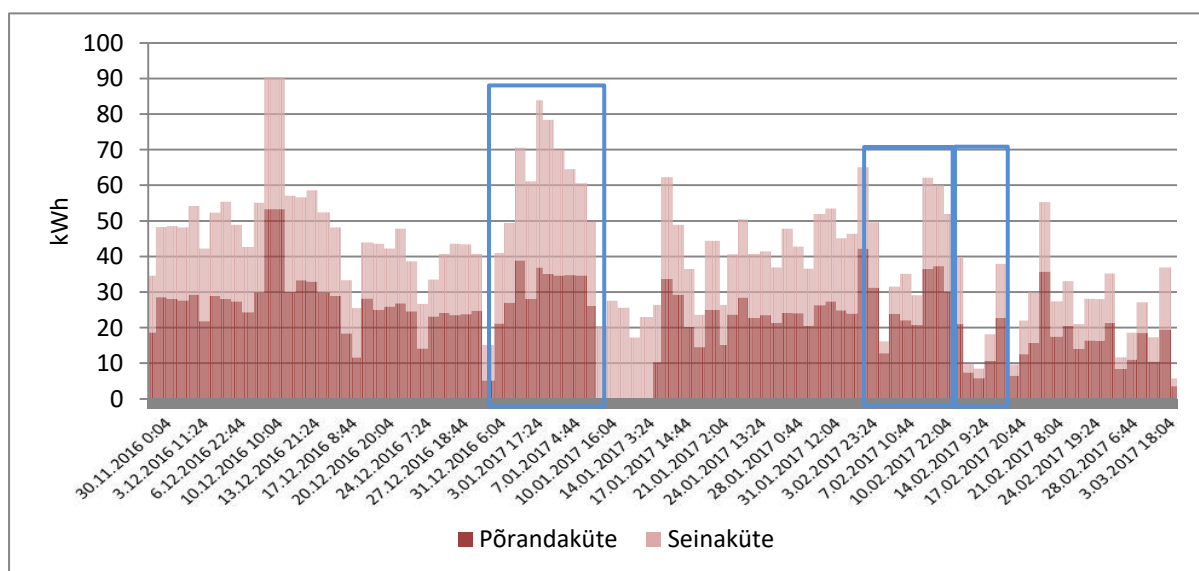
Tabel 5. Standardkliimaandmete ja 2016. aasta dets-veebr keskmise õhutemperatuuri võrdlus.

3.1 Mõõtetulemused

Hoone kütteenergiavajadus oli kogu mõõdetud aja jooksul ühtlane ja suuri langusi ega tõuse näha ei olnud. Summaarne põrand- ja seinakütte kulu arv tõuseb ühtlaselt. Küll aga on olemas väiksemad tõusud ja langused.

Joonisel 4. on kujutatud kogu perioodi küttekulu päevade kaupa, kus igas päevas on näha nii põrandakütte kui seinakütte osakaal. Sellel joonisel on märgitud sinise kastiga kolm piirkonda, mis antud töö autorile huvi pakuvad. Esimene neist on 1.-10. jaanuvar, teine 4.-12. veebruar ja kolmas 13.-15. veebruar.

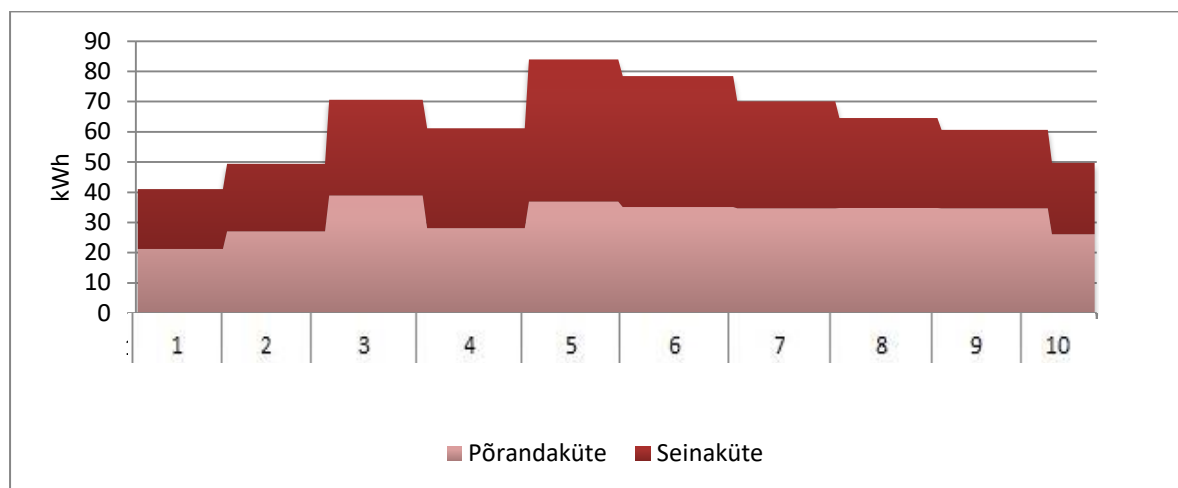
1.-10. jaanuvar oli õhutemperatuur madal ja päikesekiirguse intensiivsus mitte eriti tugev. 4.-12. veebruar oli välistemperatuur samuti madal, aga päikeseintensiivsus juba oluliselt kõrgem. 13.-15. veebruar oli välistemperatuur kõrge ja päikeseintensiivsus samuti kõrge.



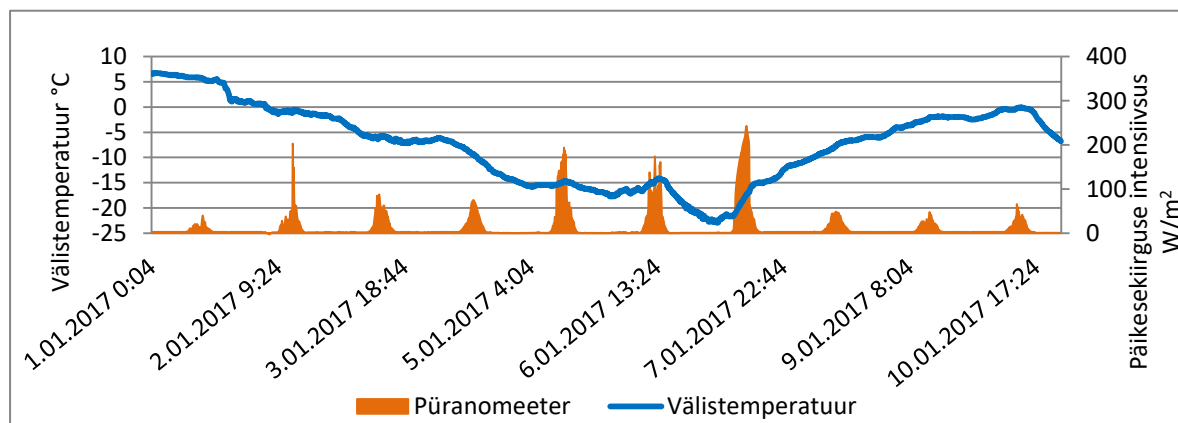
Joonis 4. Kogu perioodi põrand- ja seinakütte osakaalud.

3.1.1 1.-10. jaanuar

Esimene kütteenergiavajaduse tõusu muutus toimus perioodis 1.-10. jaanuar. Sel perioodil muutus välistemperatuur esimest korda talve jooksul alla -20°C , olles 7. jaanuaril -22°C . Keskmine välisõhu temperatuur sel perioodil oli $-7,5^{\circ}\text{C}$. Õhutemperatuur hakkas langema 2. jaanuari õhtul ja saavutas miinimumi 7. jaanuari öösel kell 04:00. Joonisel 5. on näha, et hoone kütteenergiavajadus suurenes veidi järsemalt 5. jaanuaril, kui välistemperatuur oli langenud -15°C -ni. Jahedam periood oli enne kütteenergiavajaduse tõusu kestnud 3 päeva. Aja mil läks külmaks ja aja, kui tekkis suurem kütteenergiavajadus vahele jäi 3 päeva. Niikaua suutis hoone hoida oma siseõhu temperatuuri ilma kütteenergia kasvu vajaduseta. Edasi on võimalik jooniselt 6. välja lugeda, et põrandakütte vajadus jääb alates 5. jaanuarist ühtlaseks, kui seinaküttevajadus hakkab alles alates 5. jaanuarist järk järgult vähenema. See viitab sellele, et hoone saavutas oma normaalse kütteenergiavajaduse ja seinakütte osakaal hakkas vaikselt taanduma.



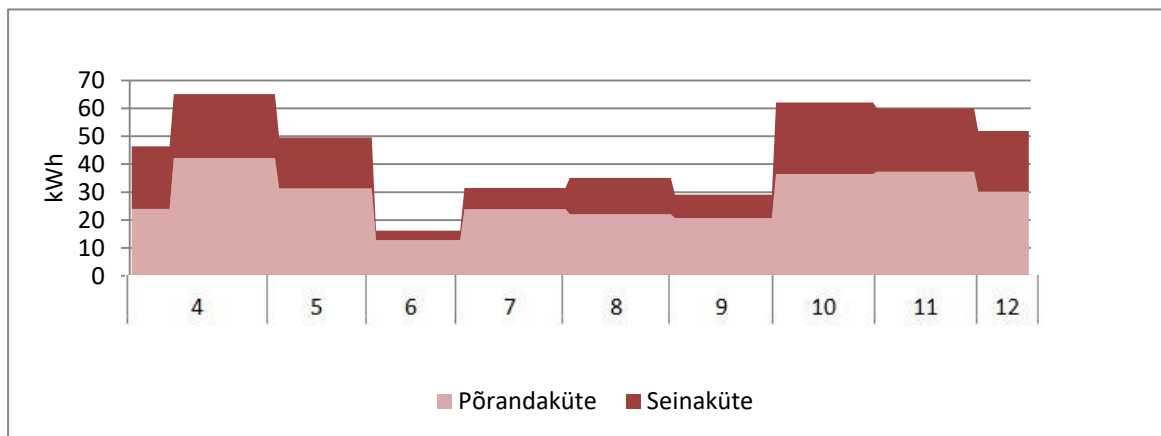
Joonis 5. Kütteenergiavajadus perioodil 01.-10. jaanuar.



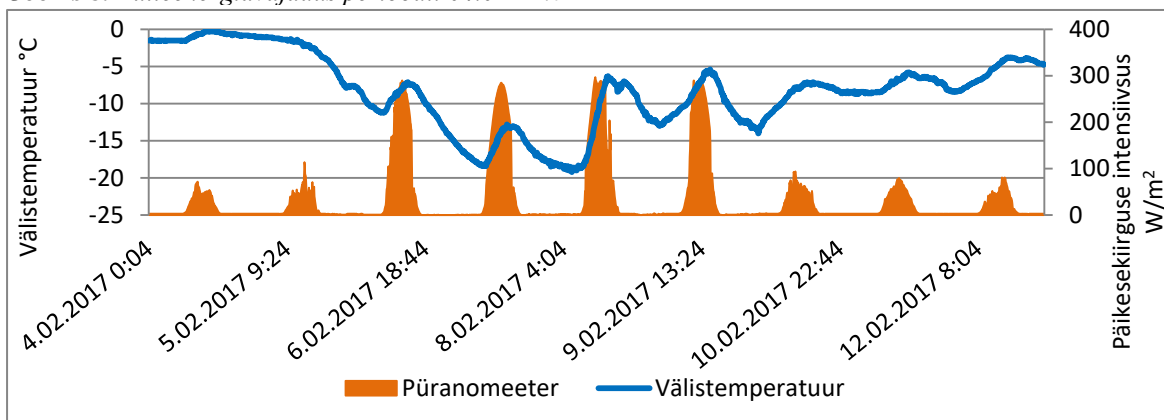
Joonis 6. Välisõhu temperatuur ja päikesekiirguse intensiivsus perioodil 01.01-10.01

3.1.2 4.-12. veebruar

Teine madala välisõhu temperatuuriga huvi pakkuv periood, oli 4.-12. veebruar. Miinimumtemperatuur sellel perioodil oli -19°C , mis saabus 8. veebruaril kell 5:24 hommikul. Keskmine temperatuur antud perioodil oli $-8,3^{\circ}\text{C}$. Keskmise õhutemperatuuri langetab periood 4.-5. veebruar, mil õhutemperatuur oli vaid $1-2^{\circ}\text{C}$ alla 0°C . Joonisel 9. on näha, et välistemperatuur hakkas väljas kiiremini langema 5. veebruari öösel. Võis eeldada, et kuna välistemperatuur oli periooditi sellel ajal väga madal, suureneb hoone kütteenergiavajadus. Joonis 8. näitab aga hoopis vatupidiselt eeldustele kerget langust. Languse põhjustas päeval õues paistnud suure intensiivsusega päike. Päikesepaiste oli nii suure intensiivsusega, et hoolimata madalast välistemperatuurist, paistis hoonesse nii palju päikeseenergiat, et kogu küte lülitus taha väga vähe. 6. veebruaril on kütteenergiavajadus silmapaistvalt teistest päevadest madalam, kuna suure päikesekiirguse intensiivsusega samal ajal oli ka välistemperatuur vaid -10°C , mitte ca -18°C nagu paar päeva varem. 7.-9. veebruar oli välisõhu temperatuur madalam ja sellest tulenevalt ka kütteenergiavajadus ühtlaselt kõrgem. Perioodil 6.-9. veebruar, kui väljas paistis iga päev päike, kulus kogu hoonel 104,8 kWh soojusenergiat. Lõunapoolsed suured aknad tagasid passiivse päikeseenergia sissepääsu ja tampsavisein salvestas seda öiseks perioodiks.



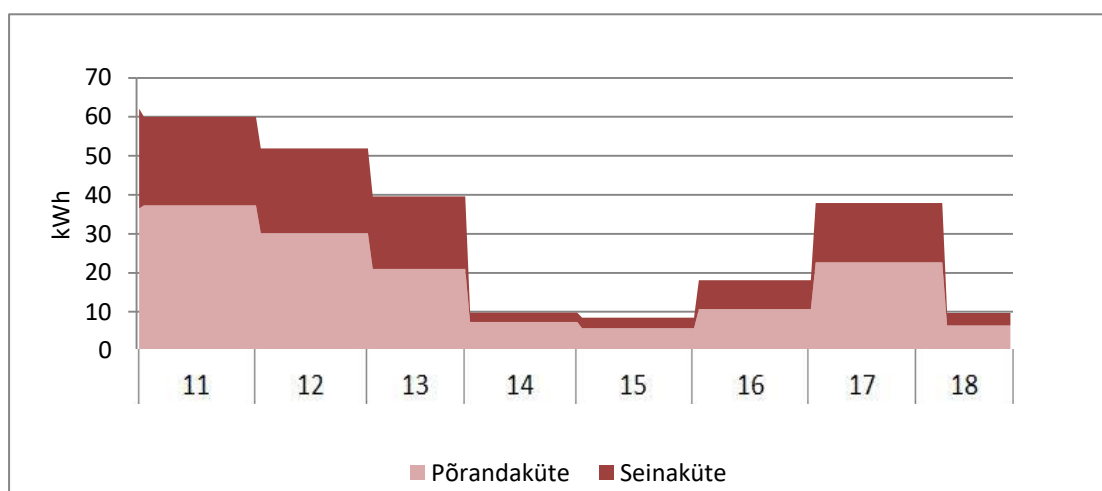
Joonis 8. Kütteenergiavajadus perioodil 04.02-12.02



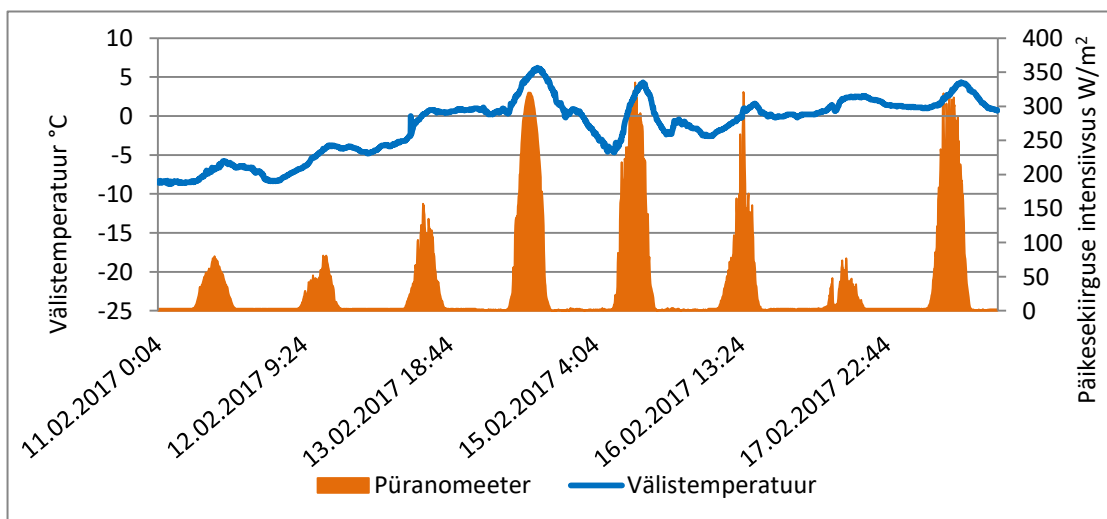
Joonis 9. Välisõhu temperatuur ja päikesekiirguse intensiivsus perioodil 04.04-12.02

3.1.3 11.-18. veebruar

Kolmas huvipakkuv periood on 11.-18. veebruar. Selles perioodis pakub meile huvi kõrge välistemperatuur ja suur päikesekiirguse intensiivsus. Sellesse perioodi mahtus jahedama välistemperatuuri taandumine ja soojemad ilmad, kui pilvitu päikesepaisteline ilm püsis. Joonisel 10. ja 11. on selgelt näha, et kui 13. veebruaril päikesekiirguse intensiivsus suurenema hakkas, hakkas ka küttekulu langema. 14.-16. veebruar paistis väljas päev läbi päike ja küttekulu langes sel perioodil silmnähtavalt väga madalaks, kuna ka välistemperatuur oli tõusnud 0°C kaadi ümber. 14.-16. veebruar oli küttekulu hoonel kokku 26,5 kWh. 17. veebruaril, kui päike ei paistnud, suurenes ka küttekulu koheselt.



Joonis 10. Kütteenergiavajadusperioodil 11.02-18.02



Joonis 11. Välisõhu temperatuur ja päikesekiirguse intensiivsus perioodil 11.02-18.02

3.1.4 Jahe päikeseline periood vs soe päikeseline periood

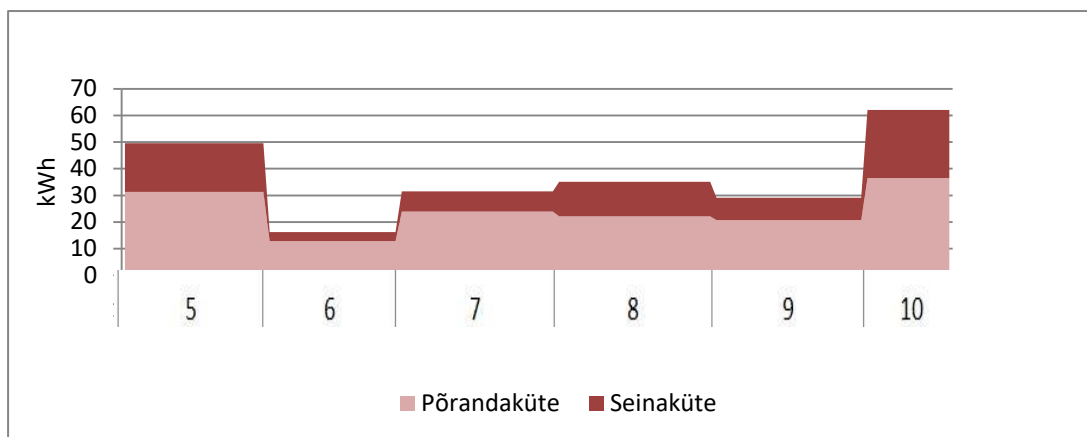
Hea on võrrelda kahte ühelt näitajalt sarnast, aga teiselt näitajalt erinevat perioodi. Nendeks on perioodid, kus ühes olid päikesepaistelisel päeval välistemperatuurid alla -10°C ja teine periood, kus olid päikesepaistelisel päeval välistemperatuurid 0°C ümber.

Joonisel 13. on näha, et kolmepäevasel perioodil 7-9 veebruar olid väljas külmad ilmad, aga päike siiski paistis. Joonisel 12. on näha selget kütteenergiavajaduse langust 6. veebruaril, kui paistis esimest päeva päike. Nende kolme päeva jooksul kulus kütteenergiat 75,6 kWh.

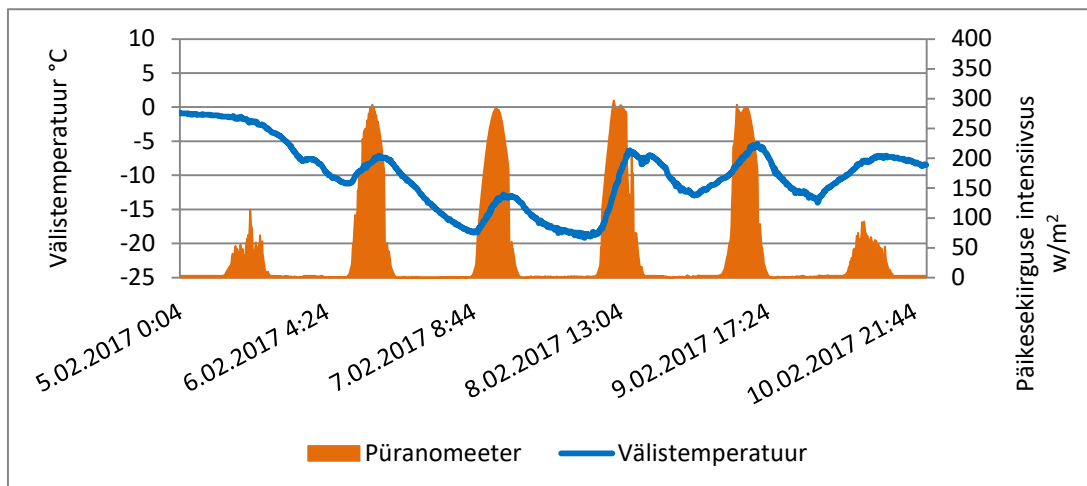
Joonisel 15. on näha, et samuti kolmepäevasel perioodil 14-16 veebruar oli väljas 0°C ümber temperatuur ja paistis samuti päike. Nendel kolmel päeval kulus kogu hoonele 26,5 kWh kütteenergiat.

Joonisel 13. on näha, et alates 7. veebruarist on välistemperatuurid alla -10°C ja paistab päike. Päikesepaistet iseloomustab kõrge ja lai püranomeetri piik.

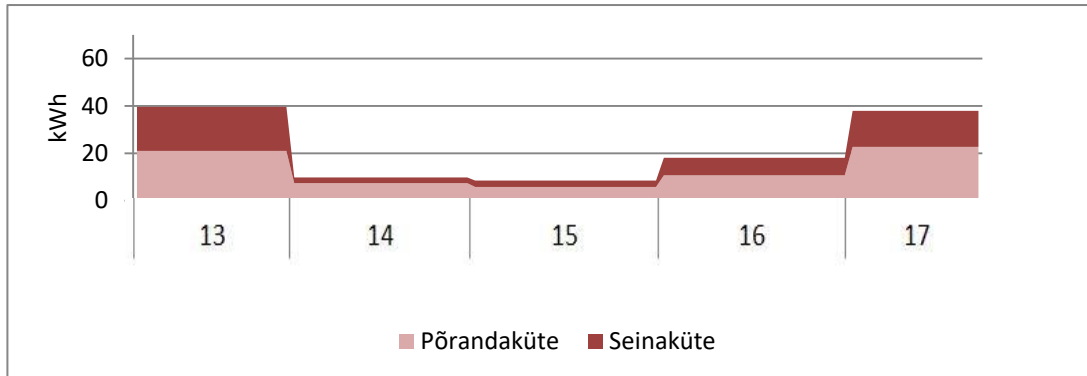
Jooniselt 15. on näha, et alates 13. veebruarist tõuseb välisõhu temperatuur 0°C juurde ja 14-16 veebruar paistab samuti iga päev päike. Joonisel 14. on näha, et kütteenergiavajadus 14-16 veebruar sellistel tingimustel on väga väike. 14-16 veebruar kulus kogu hoones 26,5 kWh kütteenergiat. On näha, et kui päike paistab ja väljas on 0°C ümber olevad temperatuurid, vajab hoone väga minimaalselt kütet ka sellisel talvekuul, kui seda on veebruar.



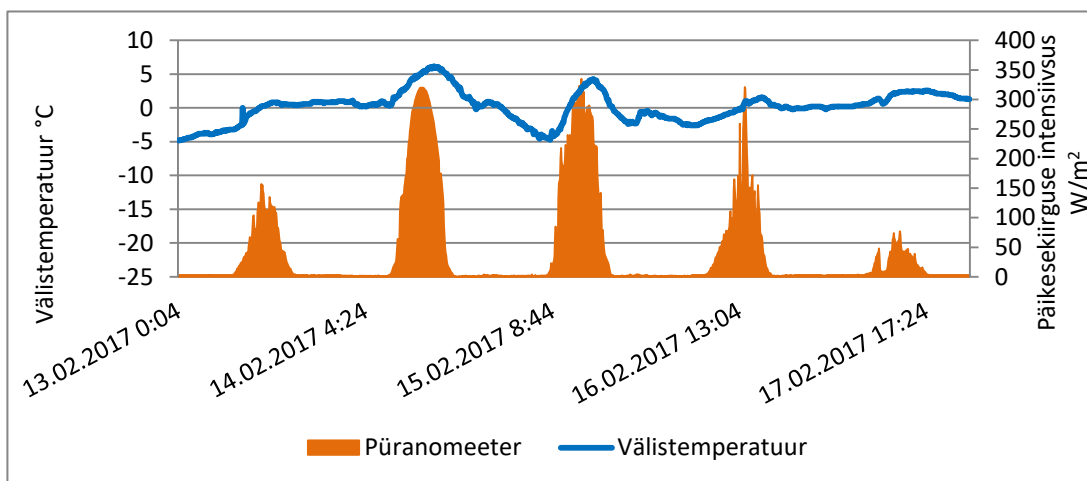
Joonis 12. Kütteenergiavajadus perioodil 05.02-10.02



Joonis 13. Välisõhu temperatuur ja päikese kiirguse intensiivsus perioodil 05.02-10.02



Joonis 14. Kütteenergiavajadus perioodil 13.02-17.02



Joonis 15. Välisõhu temperatuur ja päikese kiirguse intensiivsus perioodil 13.02-17.02

Kuupäev	Kliima	Kütteenergiavajadus (kWh)
7.-9. veebr.	Madal temp. Päikseline	75,6
14.-16. veebr.	Kõrgem temp. Päikseline	26,5

Tabel 2. -15°C ja 0°C lähedaste perioodide kütteenergiakulu kokkuvõte.

Võrreldes päikeselist külma ilma päikeselise sooja ilmaga, kulus selles hoones külmal kolmepäevasel perioodil 2,9 korda rohkem kütteenergiat.

Sellest kõigest võib järeldada, et temperatuur mõjutab ka passiivmaja kütteenergiavajaduse hulka. Kui välistemperatuurid olid madalad kulus kütteenergiat ikkagi rohkem. Siit saab aga järeldada, et jahe välistemperatuur mõjutab samadel päikesepaistetingimustel hoone kütteenergiavajadust.

3.2 Hoone massiivsuse muutmine PHPP's

Põlva maja on oma omaduste poolest massiivne hoone. Töö autorile pakkus huvi massiivsuse mõju kütteenergiavajadusele. Selleks teostas töö autor Põlva maja energiaarvutusmudelil eksperimendi.

Muutes energiaarvutusmudelil massiivne hoone keskmiselt massiivseks, muutub praegune saavutatud neto kütteenergiavajadus 14,61 kWh/m² pealt 14,70 kWh/m² peale. Hoone muutmisel kergeks, tuleks neto kütteenergiavajadus 15,32 kWh/m². Antud arve vaadates, on näha, et kergkonstruktsiooni kasutamine mõjutab hoone kütteenergiavajadust ca 5% võrra. Lisaks on väga oluline siinkohal silmas pidada seda, et hoone muutmisel kergemaks, muutuvad ka teised näitajad nagu näiteks konstruktsiooni lahendused ja soojusjuhtivused ning lisaks muutub ka kütteenergiavajaduse dünaamika.

Töö autor proovis lahendada hoone kergeks muutmisest tekkinud liigset küttekulu hoone välisseintele soojustuste lisamisega. Praegu on hoonel välisseintes 400 mm puistevilla. Kui lisada energiaarvutusmudelil 50 millimeetrit villa igasse välisseina, saaksime me erikütteenergiavajaduseks 14,53 kWh/m². See oleks piisav, et kompenseerida massiivsuse

vähendamisest tulemus, et tagada sertifikaat. Ka siin tuleb teisi muutujaid silmas pidada. Üheks oluliseks muutujaks on see, et kui suurendatakse soojustuse paksust, muutub ka aknapõse sügavus. Aknaraam jääb sügavamale seina sisse, kui ta enne oli ja see omakorda võib väga oluliselt mõjutada päikese vabaenergia jõudmist siseruumidesse. See, et tekib suurenenud vari lisatud soojustuse arvelt võib jällegi omakorda energiatõhususarvu suuremaks muuta, kuna päikeseenergiat jõuab sügavnenud aknapõskede arvelt hoonesse vähem. Lisasoojustus ei paku ka soojuse puhverdusvõimet nagu massiivsed konstruktsioonid. Seega ei ole alati lihtsalt soojustuse lisamine parim variant.

3.3 Sontex veearvesti riknemine mõõteperioodi ajal

11. jaanuaril kell 23 õhtul avastati veearvesti mõõteandmeid üles kirjutades, et põrandakütte arvesti näitab sama väärtust, mida see näitas kell 14, kui oli eelmine mõõtmise üleskirjutamise aeg. Samuti ka kell 08 samal hommikul, kui andmeid üles kirjutati, oli veearvestil väärtus sama. Väärtuse mittemuutumine viitas veearvesti purunemisele või veale. Rikkele viitas ka see, et õues oli tol päeval -10°C ja päikest paistis minimaalselt. See tähendab, et hooneel oli kindlasti küttevajadus olemas. Ka seinaküttesse mineva vee lugeja oli jätkanud oma tööd tavapärasel rütmis.

Kõik see pani töö autori kiiresti lahendusi välja mõtlema. Kuna töö autor ise mõõtmise remontimist mõistlikuks ei pidanud, proovis ta leida telefonitsi üles ettevõtte, kes hoone ehituse käigus sealsed veetorud ja küttearvestid paigaldas. Samal päeval saadi kontakt, aga kuna ettevõtte töötajad piisavalt kiiresti arvesti riknemise põhjust öelda ei osanud, oli parimaks lahenduseks terve mõõtmise välja vahetada. Uus veemõõtmise hakkas tööle 16. jaanuaril kell 16.

Sellesse perioodi, kui veemõõtmise oli rikkis mahtus 15 mõõtekorda. Et tulemused oleks adekvaatsed ja võrreldavad, tuleb mõõtmise riknemise periood tulemustesse juurde simuleerida. Kuna sel perioodil, kui andur oli vigane, oli päikest väga vähe ja mingeid muid erilisi tingimusi hoones ja hooneväliselt ei täheldatud, on tehtud arvutustes üldistus, et põrandaküttesse läks sama palju energiat kui sinaküttesse. Seinaküttesse läks sel perioodil 113,9 kWh energiat.

Kokkuvõte

Hoone kütteks vajamineva energia hulk sõltub paljuski konkreetsetes hoones kasutatud ehituslikest ja tehnoloogilistest lahendustest ja projekteerides seatud eesmärkidest. Antud töös uuriti väga energiatõhusa hoone kütteenergia vajaduse reageerimist Eesti talvises kliimas. Töös selgus, et kogu perioodi vältel oli kütteenergiavajadus ühtlane. Külmade ilmade saabudes suurenes hoone küttekulu, aga mitte märkimisväärselt. Üheks põhjuseks, miks hoone küttekulu järsult ei tõusnud on hoone massiivsus, mis on peamiselt saavutatud suure hulga savi kasutamisest. Teine põhjus, miks hoone kütteenergiavajadus külmade ilmade saabudes ei suurenenud on see, et perioodil, mil väljas oli madal õhutemperatuur paistis ka päike. Päike kütis hoone läbi lõuna küljel asuvate suurte akende soojaks. Võrreldes kahte pilvitut, kolme päevast perioodi, kus ühes oli ligikaudu -20°C külma ja teises vaid 0°C lähedased temperatuurid, selgus, et töös uuritud hoone vajas madalamate temperatuuridega perioodil kütteenergiat rohkem. Sellest hoolimata olid ka madalama temperatuuriga perioodi joonisel hästi eristatavad kütteenergiavajaduse järsu languse näol päevad, kui ilm oli pilvitu. Tööst selgus, et kuna päikeseenergia suutis madalate õhutemperatuuridega perioodil hoone seest soojana hoida, täidab Põlva passiivmaja oma ühte peamist eesmärki ehk salvestab endasse külmal perioodil passiivset päikeseenergiat ja hoiab head sisekliimat.

Summary

Space heating energy demand depends on technological solutions used in building and objectives set in projecting phase. In this study, very energy efficient building in Estonia space heating energy demand during winter was analyzed. Results showed that space heating energy demand was steady through all winter. One of the reasons why heating demand did not rise steeply when cold outside temperature was measured was that this building has a lot of massive clay inside of it and the second reason was that when outside temperatures were low, sun was shining through all day and this kept building warm from inside. When cold sunny and nearly 0°C sunny days were compared, tables showed that space heating energy demand was higher when outside temperature was lower.

Kasutatud kirjandus

- [1] J. Kurnitski, „Säästvast ehitusest pääsu pole,“ *Äripäev*, 2015.
URL: <http://www.aripaev.ee/uudised/2015/07/07/peagi-on-energiatohusad-hooned-kohustuslikud> [05.05.2017]
- [2] „Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta,“
URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027> [01.04.2017]
- [3] U.S. Energy Information Administration, “Commercial buildings energy consumption survey.” (CBECS), Märts, 2016.
URL: <https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2012/energyusage/> [20.04.2017]
- [4] Riigiteataja, Energiatõhususe miinimunõuded, Eesti, 2015.
- [5] Eesti Energia, „Energia kokkuhoid“
URL: <https://www.energia.ee/tark-tarbimine/kokkuhoid> [14.05.2017]
- [6] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, "Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030,“ Tallinn, 2015.
URL:
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/5/5b/ENMAK_2030._Eeln%C3%B5u_13.02.2015.pdf [10.04.2017]
- [7] European Comission, „Buildings“, 2017.
URL: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> [01.04.2017]
- [8] M. Mihai, V. Tanasiev, C. Dinca, A. Badea, R. Vidu, „Passive house analysis in terms of energy performance,“ *Energy and buildings.*, vol. 144, pp. 74-86, 2017.
- [9] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, M. Sarmet, „Hoonete energiatõhusest.“ ettekanne, 2012
URL: http://www.trea.ee/pagas/regul_okofest_Polva_160812.pdf [15.05.2017]
- [10] A. Arak, "Hoonete energiakulu ja sisekliima vahelised seosed," Tartu Ülikool, 2008.
- [11] American Society for Heating, Refridgerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE, „Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality“, Standard 62-1999,

Cincinnati, 1999

- [12] E. Abel, H. Voll, „Hoonete energiatarve ja sisekliima,“ Tallinn, 2007.
- [13] J. Laht, „Hoone sisekliima ja energiatõhusus Tartu koolide ja Valga lasteaia „Kaseke“ näitel,“ Tartu Ülikool, 2010.
- [14] E. Eero, „Elektrienergia tarbimise ajaline kattuvus päikesepaneelide tootlikusega liginullenergiahoones,“ Tartu Ülikool, 2015.
- [15] A. Jõelet, M. Gaskov ja M. Polikarpus, „Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnasevee füsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes,“ Tartu Ülikool, 2012.
- [16] Viessmann, „Infoleht Vitocal 300-G,“
URL: <http://www.viessmann.ee/et/elumajad/soojuspumbad/maavesi-soojuspumbad/vitocal-300g.html>. [28.03.2017]
- [17] A. Girard, E. Gago Hadraque, T. Muneer ja G. Caceres, „Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors,“ Renewable Energy, vol. 80, pp. 26-39, 2015.
- [18] Viessmann, „Heat pumps-Heating with airborne and geothermal heat“, *brošüür*, 2017.
URL: <http://www.viessmann.co.uk/en/residential-buildings/heat-pumps/ground-source-heat-pumps.html>
- [19] Eesti soojuspumbaliit, „Soojuspumba tööpõhimõte,“
URL: <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote> [02.04.2017]
- [20] Passipedia, „PHPP - Passive House Planning package, 2016.
URL: https://passipedia.org/planning/calculating_energy_efficiency/phpp_-_the_passive_house_planning_package [15.04.2017]
- [21] Elrondburrell, „Elrondburrell Passive House Blog,“ 2012.
URL: <http://elrondburrell.com/blog/passive-house-planning-package-phpp/> [02.04.2017]
- [22] International Passive House Association, „Passive House Planning Package (PHPP) + design PH.
URL: https://passivehouse-international.org/index.php?page_id=188 [03.04.2017]
- [23] Sontex, „Sontex Supterstatic 449 Data Sheet,“ brošüür, 2011

URL: <https://www.sontex.ch/en/download/data-sheet-449/?wpdmdl=2285> [26.04.2017]

[24] Sontex, „Sontex Superstatic 449 Prospect,“ brošüür, 2012.

URL: <https://www.sontex.ch/en/download/prospect-449/?wpdmdl=2371> [26.04.2017]

[25] V. Russak, A. Kallis, Eesti kiirguskliima teatmik, Tallinn, 2003.

[26] T. Mäuring, G. W. Reinberg, J. Hallik, M. Valge ja K. Kalbe, „A prototype architecture for passive and plus energy building in Estonia,“ pp. 18-29, 2013.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hans Leis

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Väga energiatõhusa hoone kütteenergiavajaduse dünaamika 2016/2017 talvel Eesti esimeses sertifitseeritud passiivmajas kogutud mõõtetulemuste põhjal“, mille juhendaja on

Kristo Kalbe,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus **22.05.2017**